のカットオフ周波数（振幅が0.707倍（－3 dB）となる周波数）は0.443 Hz（約2.2秒）であり、移動平均フィルターのロールオフ特性が－6 dB/oct であることを考えれば、数 Hz から数10 Hz の地震波の周波数帯域の信号をまだ十分低減することができない。したがって、元の地震波の振幅が十分大きければ1秒幅の移動平均フィルターを掛けてもその周波数帯域の地震波は残存してしまう。サンプリング操作によって一度エイリアシングが発生してしまえば、数 Hz から数10 Hz に残存した信号成分が対象とする現象の周波数帯域に折り返してしまい、対象とする現象が歪められると同時に、一度折り返して重畳したエイリアシング成分は決して除去することはできなくなる。

このような問題を克服し、津波あるいは音響波の信号をより正確に計測するためには、現在のケーブル式海底水圧計よりも、もっと高い周波数でサンプリングでき、かつ、もっと細かい圧力分解能を有する観測をおこなえば良い。このような観測を可能とするために、気象研究所では、新型の自己浮上式海底水圧計を平成22年度から平成24年度（2010年度から2012年度）の3カ年かけて試作し、平成25年度に実海域試験をおこなった。本小論ではその概要について報告する。

2．新型自己浮上式海底水圧計の構成と仕様

新型自己浮上式海底水圧計には、米国 Paroscientific Inc. 社製のインテリジェントタイプの圧力センサ 8CB-7000-I を水圧センサとして採用することとした。カタログ情報によれば、この水圧センサは、(1) 従来のわが国周辺に展開されたケーブル式海底水圧計（Hewlett-Packard 社製の水圧センサを使用）で採用されている10 Hz サンプリングよりも速い（最高で1 kHz）サンプリングが可能であり、(2) その圧力筐体内部に CPU、メモリなど演算処理回路を持ち、水圧センサ内部で統計演算処理（Paroscientific 社では“Nano-resolution technology”と呼称している処理）をおこなうことによって、同じサンプリング間隔のデータで比較した場合、従来の同社製の水圧センサに比べて2桁以上細かい計測分解能で水圧を計測することができる。同社製の水晶発振器の共振周波数出力タイプの水圧センサを用いて、東北大学が開発した自己浮上式海底水圧計あるいは千葉大学が開発した自己浮上式海底地震計・水圧計では、それぞれ60秒間のサンプリング間隔（正確には、水晶発振器の発振周波数の積分時間60秒間）で0.07 mmH_2O（Hino *et al*., 2009, 2014; 日野，私信）あるいは約30秒のサンプリング間隔で1 mmH_2O の計測分解能（佐藤・他，2011）を達成しているが、同じサンプリング周期でみると8CB-7000-I の計測分解能は25倍あるいは350倍細かい。

図1の赤色の破線は、8CB-7000-I の圧力分解能（カタログ値）を示している（Paroscientific Inc., 2010)。同じサンプリング周期で比較すると、8CB-7000-I の圧力分解能は、気象庁の東南海ケーブル式海底水圧計の圧力分解能と比べて、サンプリング周期0.1秒で1/30程度、1秒で1/100程度、細かい。この水圧センサを海底水圧計に採用すれば、現状のケーブル式海底水圧計のサンプリング周期0.1秒かつ圧力分解能1 cmH_2O（100 Pa）という観測ウィンドウの下限をさらに拡張することが可能になると期待される。

新型自己浮上式海底水圧計を開発するにあたり、ガラス球やトランスポンダなど共通化できる部分が多いことなどから、気象研究所が所有する(株)東京測振製の自己浮上式海底地震計 TOBS-24N を改造することとした。今回試作した気象研の新型自己浮上式海底水圧計の構成図を図2に、主要な仕様を表2に示す。図2の、破線の灰色枠内の部分を今回新たに試作あるいは改造した。それ以外の部分は既存の TOBS-24N の部品をそのまま使用した。

TOBS-24N からの主な変更箇所を以下に列挙する。
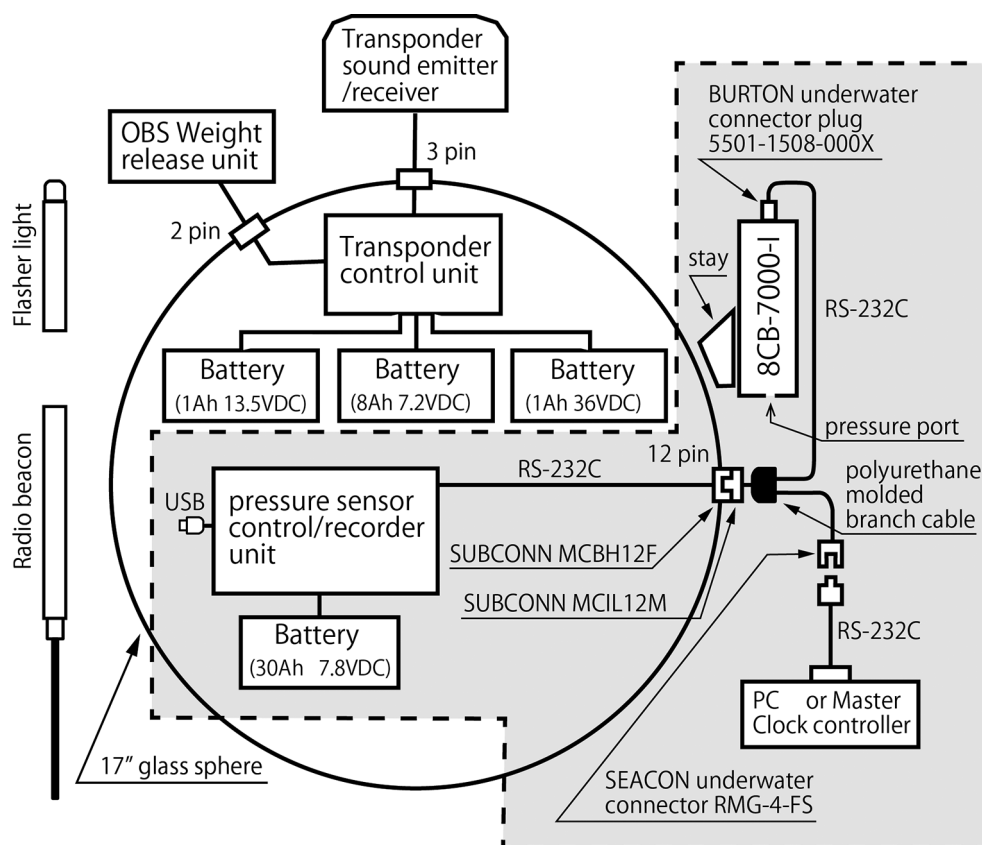
Fig. 2 Block diagram of the newly developed, Meteorological Research Institute (MRI) free-fall/pop-up OBPG based on an existing MRI pop-up ocean-bottom seismometer (Tokyo Sokushin, Inc.). Gray area bounded by the dashed line indicates converted or newly developed units. Units outside the gray area are unchanged from the existing MRI seismometer implementation.

図2　試作した気象研の新型自己浮上式海底水圧計の構成図。気象研が所有している(株)東京測振製の自己浮上式海底地震計 TOBS-24N を改造した。破線で囲まれた灰色部分が今回新たに試作・改造した部分。破線で囲まれた灰色部分以外の部分は、TOBS-24N のものをそのまま使用。

(1) 水圧センサ8CB-7000-I 用の制御収録装置の試作（写真１）。

水圧センサ8CB-7000-I 用の制御収録装置を試作し、地震計とハイドロフォンの双方の計測データを収録する制御収録装置の代わりに、ガラス球内部に取付けた。地震計とハイドロフォンからの信号はアナログ信号であり、既存の TOBS-24N の制御収録装置にはプリアンプと A/D 変換装置などが内蔵されていたが、水圧センサ8CB-7000-I の通信制御は RS-232C シリアル通信でおこなわれるため、試作した水圧センサ用の制御収録装置ではプリアンプと A/D 変換装置は不要になった。また、水圧センサ自身は最高で 1 kHz サンプリングが可能であるが、今回試作した制御収録装置は最高で100 Hz（10 msec）サンプリングで水圧データが計測可能な仕様とした。

(2) ハイドロフォンと外部通信制御兼用の10 pin 水中コネクタを、SUBCONN 社製12 pin 水中コネクタに変更。

変更後の SUBCONN 社製12 pin 水中コネクタを経由する信号線や、他の装置との配線図を図３に示す。SUBCONN 社製12 pin 水中コネクタの12芯のうち、４芯は水圧センサ8CB-7000-I との RS-232C 通信制御に用いられる。もう４芯は PC との通信制御あるいは東京測振製の GPS クロック TMC-8200との通信制御の双方に用いられる。残り４芯は現在使用していないが、もしも水圧センサとの通信制御を RS-485経由でおこなう必要が生じた場合などに使用できる。

Table 2　Specifications of the newly developed MRI pop-up OBPG

表２　新型自己浮上式海底水圧計の仕様

MRI pop-up ocean-bottom pressure gauge

（1）耐圧ガラス球

寸法：外径17インチ　内径15.9インチ　　　耐圧水深：最大6,700 m

コネクタ類：12 pin × 1 （水圧計記録制御／外部通信制御）

3 pin × 1 （音響トランスポンダ送受波器接続用）

2 pin × 1 （切り離し装置接続用）

バキュームポート×１　　　ハードハット：H22インチ×W22インチ×H19インチ

（2）電源（最長で６ヶ月間の観測が可能）

制御収録部用電池：OBB-24N-16型（30 Ah/3.9 V リチウム電池セル２直列×10組；６ヶ月間の観測）

水圧センサ用電池：制御収録部用電池と共用

トランスポンダ用電池：L-G2BA 型（12ヶ月仕様）

（※３ヶ月観測仕様の短期型 OBS は、L-G2BA 型（５ヶ月仕様））

（3）水圧センサ：Paroscientific 8CB-7000-I（インテリジェント・タイプ）

圧力測定範囲：水深換算で０m（大気圧）～約7000 m

圧力測定精度：フルスケールの0.01％以下

圧力／温度分解能および計測データの必要表示桁数：（表３）

入出力信号インターフェース：RS-232C（水圧センサとしては他に RS-485にも対応）

入力電圧：最小＋6 VDC ～ +16 VDC

消費電力：待機時16.5 mA　　最大32 mA @+６VDC

温度感度：１度の温度変化に対して、フルスケールの0.0008％未満

耐圧筐体：ステンレス　　直径：5.51 cm　長さ：27.5 cm

耐圧深度：約8400 m

空中重力：1.33 kg

（4）制御収録部

水圧センサとの入出力信号インターフェース：RS-232C（通信速度115200 bps を推奨）

収録データタイプ：テキストデータ

データ収録間隔：10 msec 単位で設定

記録媒体：320 GB　HDD

収録データ読み出し方法：USB 接続によるデータ読み出し

消費電力：0.1 W 以内

（5）音響トランスポンダ

受信チャンネル：3 ch　　受信周波数：8.0-11.0 kHz　　送信周波数：8.3-10.7 kHz

（6）ラジオビーコン

空中線電力：0.1-0.2 W　　送信周波数：41-44 MHz　　電波形式：A1　　有効距離：20 km

（7）フラッシュライト

発光間隔：２秒　　発光形式：キセノンガス放電　　電力：0.1 J

（8）切り離し装置：電蝕式（１カ所で電蝕）

（9）錘兼架台

寸法：L 65 cm × W 65 cm × H 25 cm　　空中重量：約35 kg　　水中重量：30.8 kg（重量は錘２式含む）

（3）17インチのガラス球に据え付けられた SUBCONN 社製12 pin 水中コネクタ・レセプタクル（MCBH12F）に、外側から接続する二股分岐ケーブルの製作（写真２）。

今回開発した新型海底水圧計専用に、二股分岐ケーブルを特別に製作した。二股分岐ケーブルの３本は半田付けで接合し、新たに設計したモールド用の金型に固定した上、ポリウレタンコンパウンドを金型に注ぎ込み、コンパウンドを硬化させて製作した。次に二股分岐ケーブルの親側ケーブルには SUBCONN 社製12 pin 水中コネクタ・プラグ（MCIL12M）を、子側ケーブルの２本のうち、１本には BURTON 社製水中コネクタ・レセプタクルを、もう１本には SEACON 社製水中コネクタ・レセプタクルをモールドした。

試作した二股ポリウレタンモールドケーブルは耐水圧検査をおこなった。検査の概要は以下のとおり。①15分かけて0.1 MPa から29.4 MPa（水深3000 m 相当）まで加圧後、②29.4 MPa の水圧を２時間保持し、
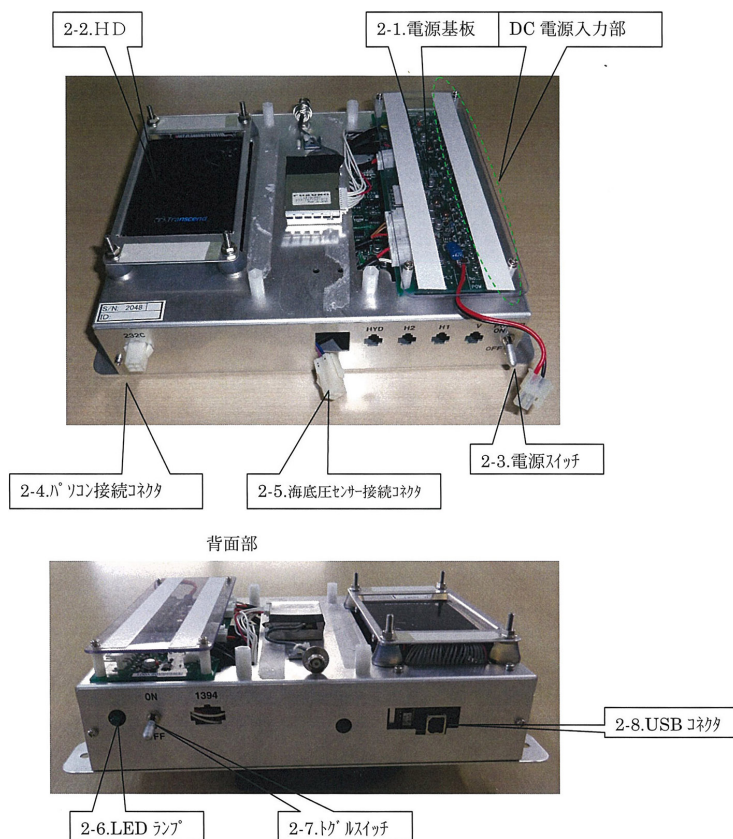
Photo 1　Pressure sensor control/recording unit, newly developed in this study.

写真 1　試作した制御収録部。写真中の説明の「2-X ○○○○○」の「2-X」は新型自己浮上式海底水圧計制御収録装置の取扱説明書（東京測振，2013）の章番号に対応する。「2-4. パソコン接続コネクタ」と「2-5. 海底圧センサー接続コネクタ」は、RS-232C 通信ケーブルで、17インチガラス球に取り付けられた SUBCONN MCBH12F レセプタクルに接続される。
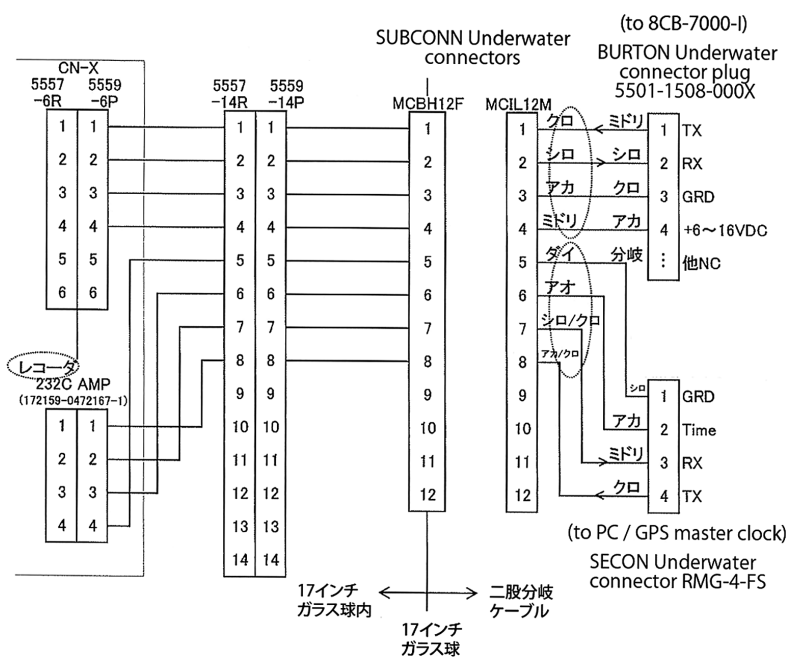
Fig. 3　Wiring/cabling diagram for connection of the pressure sensor control/recording unit, housed within a 17-inch (43.2 cm) glass sphere, and the PC/GPS master clock.

図 3　ガラス球内部の制御収録装置、水圧センサ、PC/GPS マスタークロックとの配線図。
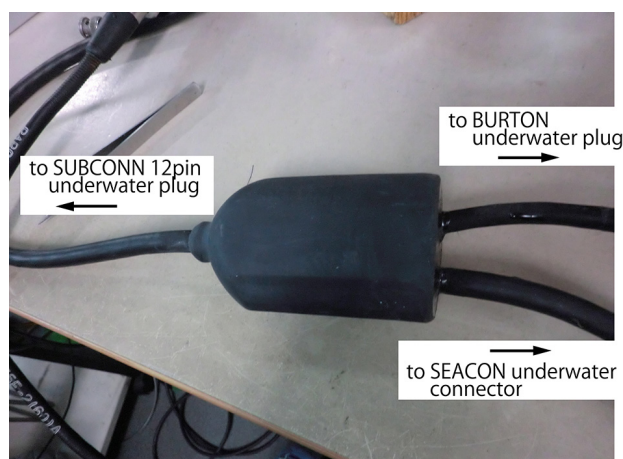
Photo 2　Branching cable junction made of molded black polyurethane.

写真２　二股分岐ケーブルの黒色のポリウレタンモールド部。

③15分かけて0.1 MPa まで減圧する試験を実施。その後、④ケーブル導通試験、ピンの間の絶縁抵抗試験、外観異常や水漏れが起きていないかの外観チェックをおこない、異常のないことを確認した。この二股ケーブルを介して、それぞれ図２のように、制御収録装置、水圧センサ、PC/GPS マスタークロックとの通信制御がおこなわれる。

(4) 水圧センサ8CB-7000-I をガラス球を覆うハードハットに固定するためのステンレス製の据え具（ステー）の製作。

8CB-7000-I は空中重量で１kg 以上あり、海中落下時／回収時／海底着底時の脱落防止のため、専用の治具を製作した。

新型自己浮上式海底水圧計の開発は平成22年度から平成24年度（2010年度から2012年度）の３カ年かけて段階的におこなわれた。平成22年度は水圧センサのカタログ調査と導入、平成23年度は制御収録部の試作および、制御収録部の陸上試験（約半年間の試験）、平成24年度はケーブル・コネクタ類と水圧センサの治具の製作、制御収録部のファームウェアの改良、そして新型自己浮上式海底水圧計の組立をそれぞれ実施した。写真３は完成した新型自己浮上式海底水圧計の試作機の外観である。

新型自己浮上式海底水圧計の観測にあたって事前設定が必要な計測モード及び計測パラメータについて述べる。なお、制御収録装置の操作方法の詳細については同装置の取扱説明書（東京測振，2013)、本研究では水圧センサ8CB-7000-I そのものの開発は行っていないため、同水圧センサの計測パラメータの詳細並びに圧力等の測定原理については水圧センサ8CB-7000-I の取扱説明書（Paroscientific Inc., 2010）をそれぞれ参照されたい。

ｉ）計測モード：KP0/KP1/KP2

水晶発振器の発振周波数は圧力と温度の両方の影響を受けて変化する。そのため、正確な圧力値を得るには温度補正を行う必要がある。水圧センサ8CB-7000-I は温度補正のため圧力筐体内部の温度を温度測定用の水晶発振器で測定しており、圧力筐体内部の演算回路で温度補正された圧力値と、それに用いた温度値を外部からの制御コマンドによってテキスト出力する機能を備えている。本研究で開発した制御収録装置は、水圧センサに対して、Paroscientific 社が定義した圧力計測及び温度計測のための制御コマンドを送信し、その出力（圧力値、温度値）に時刻スタンプを付加した上で電子記録媒体に収録する機能を有する。

圧力及び温度を計測するための具体的な制御方法としては３種類あり、それぞれ KP0、KP1、KP2という
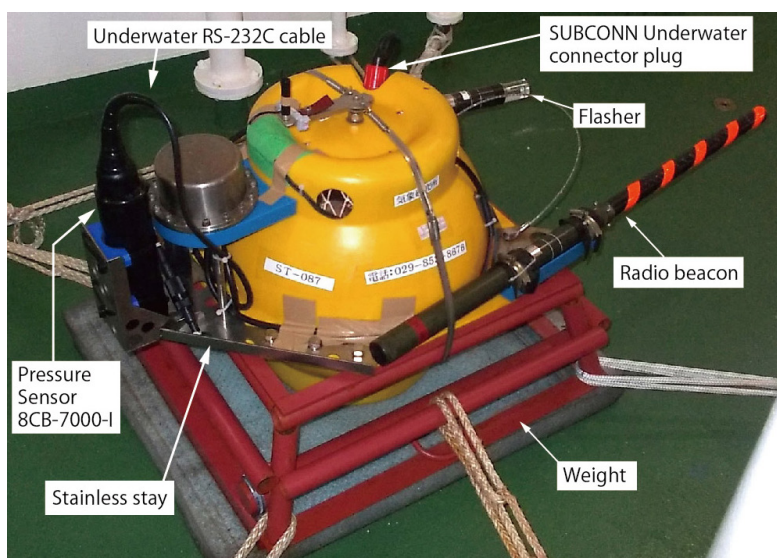
Photo 3　Newly developed pop-up OBPG.
写真 3　 新型自己浮上式海底水圧計の試作機の外観。

計測モードが用意されている。KP0は、水圧センサ8CB-7000-I をそれ自身に備わった連続データ計測モードで作動させる場合に使用する。この場合、制御収録装置から水圧センサへ与える計測制御コマンド、例えば「KP_0_XX_06000」というコマンド行が制御収録装置から水圧センサへ 1 回だけ発行される。ここで、「XX」は Paroscientific 社が定義した制御コマンドのうち連続測定コマンド（P2, P4, Q2, Q4）のいずれかを、「_」は半角スペースを意味し、P2、P4、Q2、Q4はそれぞれ圧力測定周期（感圧水晶発振器の発振周波数の測定時間の長さ）、圧力、温度測定周期（感温水晶発振器の発振周波数の測定時間の長さ）、温度のいずれかを連続計測するためのコマンドである。KP0計測モードでは、連続データ計測動作は水圧センサ8CB-7000-I の圧力筐体内部に装備されたクロックによって管理される。連続測定コマンドの詳細は水圧センサ8CB-7000-I の取扱説明書（Paroscientific Inc., 2010）を参照されたい。

KP1は、圧力値のみを計測する計測モードであり、Paroscientific 社が定義した P3コマンド（圧力を 1 回だけ測定する命令）を、制御収録装置に内蔵されたクロックで管理された一定の時間間隔で、水圧センサ 8CB-7000-I に繰り返し送信することにより、水圧センサで圧力計測動作がおこなわれる。

KP2は、圧力値及び温度値を同時に計測するモードであり、Paroscientific 社が定義した P3コマンドと Q3コマンド（温度を 1 回だけ測定する命令）を交互に、制御収録装置に内蔵されたクロックで管理された一定の時間間隔で、水圧センサ8CB-7000-I に繰り返し送信することにより、圧力計測と温度計測がおこなわれる。

KP0、KP1、KP2、どの計測モードにおいても、後述する制御パラメータ PI で圧力値および温度値の計測分解能が規定される。

ii ）圧力値の「計測積分時間」（Pressure measurement integration time）: PI

後述する制御パラメータ XM ＝ 0 の場合は、感圧水晶発振器のカウンタ数を積分する時間の長さ（msec）。XM ＝ 1 あるいは XM ＝ 2 の場合は、PI で指定される時間は、水圧センサから計測データが出力（報告）される時間間隔（data reporting interval）を意味する。なお、PI が変更されると感温水晶発振器の積分時間（TI）も、自動的に PI と同じ値に変更される（Paroscientific Inc., 2010）。

iii）カットオフ周波数 : IA

IIR フィルター（XM ＝ 1 ）モードにおけるカットオフ周波数の設定。表 3 を参照されたい。

Table 3　Pressure/temperature measurement resolution of the 8CB-7000-I depth sensor
表3　圧力センサ8CB-7000-Iの圧力 / 温度分解能[*1]

IA	Cut-off frequency (Hz)[*2]	Recommended, minimum sampling interval (msec)[*3]	Pressure/temperature measurement resolution	Pressure/temperature digits
1	700	1	200 ppm	7
2	350	2	56 ppm	7
3	175	3	14 ppm	8
4	88	6	4.5 ppm	8
5	44	11	1.0 ppm	8
6	22	22	0.35 ppm	9
7	11	44	0.14 ppm	9
8	5.5	89	45 ppb	10
9	2.8	178	14 ppb	10
10	1.4	350	4.5 ppb	11
11	0.7	700	1.6 ppb	11
12	0.35	1400	0.7 ppb	12
13	0.18	2800	0.5 ppb	12
14	0.09	5600	0.4 ppb	12
15	0.045	11200	0.4 ppb	12
16	0.023	22400	0.4 ppb	12

[*1] Pressure/temperature resolution during IIR-filter measurement mode.
ローパスIIRフィルター計測モード時の圧力 / 温度分解能
[*2] Cut-off frequency is defined the -3 dB point of the IIR-filter.
カットオフ周波数はIIRフィルターレスポンスが -3 dBとなる周波数。
[*3] Recommended, minimum sampling intervals that are satisfied the sampling theorem.
サンプリング定理を満たす最小サンプリング間隔の推奨値。

ⅳ）コマンド待機時の挙動：FM（Fetch Mode）

計測動作をトリガーモードでおこなう（Trigger: FM＝0）か、フェッチモード、すなわち常時、バックグラウンドでおこなう（Fetch: FM＝1）かの指定。従来のParoscientific社インテリジェント水圧センサはトリガーモードで計測していた。

ⅴ）積分の実行タイミング：OI（Simultaneous Integration or Sequential Integration Simulation）

圧力値及び温度値を計測する際に、各物理量の積分を同じタイミングで実行するか（OI＝0）、交互に実行するか（OI＝1）の指定。なお、最近のマイクロプロセッサ技術の進展により、OI＝1でも感圧水晶発振器と感温水晶発振器からのカウンタ数の積分そのものは同時におこなわれ、おのおのの出力タイミングを交互にずらして計測している。

ⅵ）デジタルフィルターの型：XM（Resolution Mode）

統計演算処理（Nano-resolution）モードにおけるフィルターの型の設定。XM＝1ならIIRフィルター、XM＝2ならFIRフィルター。なお、XM＝0は統計演算処理をおこなわない従来の計測モード。

ⅶ）計測値の桁数：XN（Numeric digits）

計測時の数値の桁数。XN＝0を指定すると、デフォルト値すなわち表3最右列記載の桁数（各IAでの計測に必要な桁数）に設定される。

ⅷ）圧力値の単位：UN（pressure engineering units）

計測時の圧力の単位。psi（UN＝1）、hPa（UN＝2）、MPa（UN＝5）など。